

# KECEPATAN PUTARAN DAN FREKUENSI GENERATOR PADA KONDISI BEBAN TIDAK SEIMBANG

Asmar<sup>1)</sup>, Sasongko Pramono Hadi<sup>2)</sup>, T. Haryono<sup>3)</sup>

<sup>1,2,3)</sup> Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi  
Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281 Indonesia

## ABSTRACT

*Load imbalance caused instantaneous power generator contains components sinusoidal. There is a difference of energy between the stator and rotor always. The energy difference must be balanced by the rotor by means of decrease or increase speed. This gives rise to oscillations in the power angle, frequency and rotation speed of the generator. To determine the oscillation amplitude of the power angle, the instantaneous power generator should be expressed as a function of power angle. This is done by the method of symmetrical components. Angle at steady state power is the amount of power angle caused by the active power and the generator power angle caused by sinusoidal components. The frequency and speed of rotation angle based power generator is known. Oscillation frequency and rotation speed of the generator is affected by the power generated by the negative sequence components, generator inertia constant and damping factor.*

**Keywords:** Imbalance, symmetrical components, instantaneous power, power angle, frequency, speed of rotation.

## 1. PENDAHULUAN

Tegangan yang dibangkitkan oleh generator adalah tegangan tiga fasa seimbang. *Magnitude* pada setiap fasa memiliki nilai yang sama dan masing-masing berbeda fasa  $120^0$ . Tetapi tegangan pada jaringan dapat menjadi tidak seimbang. Penyebab ketidakseimbangan tegangan adalah pembagian beban yang berbeda antara satu fasa dengan fasa lainnya pada sistem tiga fasa (A. von Jouanne dan B. Banerjee, 2000). Penyebab lainnya adalah hubungan belitan trafo (R. Bergeron, 1989) dan saluran yang tidak ditransposisikan (M. H. Hesse and J. Sabath, 1971). Ketidakseimbangan dapat merambat dari satu bagian kebagian lainnya sehingga pada bagian tertentu dari

jaringan ketidakseimbangan akan semakin besar (M. Chindris dkk, 2007), (P. Paravithana dkk, 2009).

Pada kondisi seimbang, daya sesaat memiliki nilai yang tetap (H. Saadat, 1999), sedangkan pada kondisi takseimbang, daya sesaat tiga fasa mengandung dua komponen, yaitu komponen yang nilainya tetap dan komponen yang berosilasi dengan frekuensi dua kali frekuensi sumber (W.J. Bonwick dan P.J. Hession, 1992), (Usta dan M. Bayrak, 1999). Komponen daya aktif merupakan daya aktif tiga fasa dan nilainya dipengaruhi oleh arus urutan positif sedangkan komponen sinusoidal dipengaruhi oleh arus urutan negatif (Usta dan M. Bayrak, 1999). Pada kondisi tak

seimbang, arus urutan negatif menghasilkan *mmf* (*magnetomotive force*) yang berputar berlawanan dengan putaran rotor, sedangkan resultan *mmf* oleh arus urutan nol adalah nol (P. Kundur, 1994)

Jurnal ini membahas tentang pengaruh komponen osilasi daya terhadap kecepatan dan frekuensi generator. Untuk mengetahui hal tersebut, daya sesaat generator harus dinyatakan sebagai fungsi sudut daya. Kemudian hubungan yang diperoleh diterapkan pada persamaan ayunan sudut daya. Persamaan ayunan dianalisis untuk memperoleh sudut daya, kecepatan putaran dan frekuensi pada kondisi *steady state*.

## I. Daya Generator Sebagai Fungsi Sudut Daya

### A. Sudut Daya

Daya generator pada gambar 1 dapat dianalisis dengan metode komponen simetris (W. D. Stevenson, 1993). Tegangan internal generator adalah tegangan seimbang, yaitu :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E|\angle\alpha \\ |E|\angle(-120+\alpha) \\ |E|\angle(120+\alpha) \end{bmatrix}$$

Tegangan bus 2 adalah :

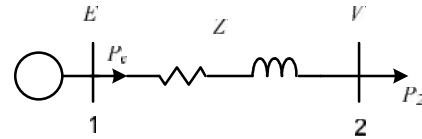
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_a|\angle\beta_a \\ |V_b|\angle(-120+\beta_b) \\ |V_c|\angle(120+\beta_c) \end{bmatrix}$$

Komponen simetris arus untuk fasa a adalah :

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \frac{3|E|\angle\alpha - |V_{a1}|\angle\beta_1}{Z_1} \\ \frac{-|V_{a2}|\angle\beta_2}{Z_2} \\ \frac{-|V_{a0}|\angle\beta_1}{Z_0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Persamaan (1) menunjukkan bahwa pembangkitan daya aktif generator dipengaruhi oleh komponen urutan positif. Sudut daya adalah beda fasa tegangan internal generator dengan tegangan urutan positif bus 2, yaitu :

$$\delta = \alpha - \beta_1 \quad (2)$$



Gambar 1. Jaringan yang digunakan untuk memperoleh daya generator dengan komponen simetris

### B. Daya oleh komponen urutan positif

Daya pada fasa a yang dihasilkan oleh komponen arus urutan positif adalah :

$$S_{a1} = E_a I_{a1}^* \quad (3)$$

Diperoleh :

$$P_{a1} = \frac{|E|}{|Z_1|} \left( \frac{R_1}{|Z_1|} |E| + |V_{a1}| \cos(\delta + \beta_1 - \phi_1) \right) \quad (4)$$

$$Q_{a1} = \frac{|E|}{|Z_1|} \left( \frac{X_1}{|Z_1|} |E| + |V_{a1}| \sin(\delta + \beta_1 - \phi_1) \right) \quad (5)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{X_1}{-R_1} \right) + \beta_1 \quad (6)$$

Daya yang dihasilkan oleh komponen urutan positif sama seperti kondisi sistem yang seimbang. Daya pada setiap fasa memiliki nilai yang sama. Jadi daya pada fasa b dan c adalah :

$$P_{b1} = P_{a1} \quad Q_{b1} = Q_{a1} \quad P_{c1} = P_{a1} \quad Q_{c1} = Q_{a1} \quad (7)$$

### C. Daya oleh komponen urutan negatif

Daya fasa a yang dihasilkan oleh arus urutan negatif adalah:

$$S_{a2} = E_a I_{a2}^* \quad (8)$$

Diperoleh :

$$P_{a2} = \frac{|E||V_{a2}|}{|Z_2|} \cos(\delta + \beta_1 - \phi_2) \quad (9)$$

$$Q_{a2} = \frac{|E||V_{a2}|}{|Z_2|} \sin(\delta + \beta_1 - \phi_2) \quad (10)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{X_2}{-R_2} \right) + \beta_2 \quad (11)$$

Daya fasa b yang dihasilkan oleh arus urutan negatif adalah:

$$S_{b2} = E_b I_{b2}^* = a S_{a2} = (-0.5 + j0.866)(P_{a2} + jQ_{a2}) \quad (12)$$

Diperoleh :

$$P_{b2} = -0.5P_{a2} - 0.866Q_{a2}, \quad Q_{b2} = 0.866P_{a2} - 0.5Q_{a2} \quad (13)$$

Daya fasa c yang dihasilkan oleh arus urutan negatif adalah :

$$S_{c2} = E_c I_{c2}^* = a^2 S_{a2} = (-0.5 - j0.866)(P_{a2} + jQ_{a2}) \quad (14)$$

Diperoleh :

$$P_{c2} = -0.5P_{a2} + 0.866Q_{a2}, \quad Q_{c2} = -0.866P_{a2} - 0.5Q_{a2} \quad (15)$$

### D. Daya oleh komponen urutan nol

Dengan cara yang sama seperti pada bagian C, daya fasa a yang dihasilkan oleh arus urutan nol adalah :

$$P_{a0} = \frac{|E||V_{a0}|}{|Z_0|} \cos(\delta + \beta_1 - \phi_0) \quad (16)$$

$$Q_{a0} = \frac{|E||V_{a0}|}{|Z_0|} \sin(\delta + \beta_1 - \phi_0) \quad (17)$$

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{X_0}{-R_0} \right) + \beta_0 \quad (18)$$

Daya fasa b dan c yang dihasilkan oleh arus urutan nol adalah :

$$P_{b0} = -0.5P_{a0} + 0.866Q_{a0}, \quad Q_{b0} = -0.866P_{a0} - 0.5Q_{a0} \quad (19)$$

$$P_{c0} = -0.5P_{a0} - 0.866Q_{a0}, \quad Q_{c0} = 0.866P_{a0} - 0.5Q_{a0} \quad (20)$$

## II. Daya Sesaat Generator

Daya sesaat tiga fasa dapat dinyatakan sebagai fungsi daya aktif dan daya reaktif (Saadat, 1999), yaitu :

$$P = P_a + P_b + P_c \\ p = P_a(1 + \cos(2\omega t + 2\alpha_a)) + Q_a \sin(2\omega t + 2\alpha_a) + \\ P_b(1 + \cos(2\omega t + 2(\alpha_b - 120))) + Q_b \sin(2\omega t + 2(\alpha_b - 120)) + \\ P_c(1 + \cos(2\omega t + 2(\alpha_c + 120))) + Q_c \sin(2\omega t + 2(\alpha_c + 120)) \quad (21)$$

Untuk memperoleh daya sesaat berdasarkan komponen simetris, daya aktif dan daya reaktif pada persamaan (24) diganti dengan daya aktif dan daya reaktif dari masing-masing komponen urutan. Daya sesaat oleh komponen urutan positif adalah :

$$P_1 = P_{a1} + P_{b1} + P_{c1} \quad (22)$$

$$P_1 = \frac{3|E|}{|Z_1|} \left( \frac{R_1}{|Z_1|} |E| + |V_{a1}| \cos(\delta + \beta_1 - \phi_1) \right) \quad (23)$$

Daya oleh komponen urutan positif sama seperti daya pada kondisi sistem seimbang. Fasor daya memiliki besar yang sama dan masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$  sehingga jumlah daya sesaat adalah daya aktif generator dan nilainya selalu tetap.

Daya sesaat oleh komponen urutan negatif memiliki besar dan beda fasa yang sama, tetapi fasornya berlawanan dengan urutan fasa. Dengan mensubstitusi daya aktif dan daya reaktif komponen urutan negatif pada persamaan (24), diperoleh :

$$p_2 = \frac{3|E||V_{a2}|}{|Z_2|^2} \cos(-2\omega_s t - (\delta + \beta_1) - \phi_2) \quad (24)$$

Daya oleh arus urutan nol memiliki besar dan beda fasa yang sama. Daya sesaat yang diakibatkan oleh komponen urutan nol sama dengan nol.

Daya sesaat generator adalah jumlah daya sesaat masing-masing komponen urutan, yaitu :

$$p_e = P_1 + p_2 \quad (25)$$

Daya sesaat generator terdiri dari dua komponen, yaitu komponen yang memiliki nilai tetap yang merupakan daya aktif generator dan komponen sinusoidal. Daya aktif dipengaruhi oleh komponen urutan positif sedangkan komponen sinusoidal dipengaruhi oleh komponen urutan negatif.

### III. Penyelesaian Steady State Persamaan Ayunan Sudut Daya

Persamaan ayunan sudut daya adalah :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} \left( P_m - D \frac{d\delta}{dt} - p_e \right) \quad (26)$$

Pada kondisi *steady state*, persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan menjumlahkan tanggapan sudut daya yang diakibatkan oleh daya aktif generator dan sudut daya yang diakibatkan oleh komponen sinusoidal. Daya mekanik generator ( $P_m$ ) sama dengan daya aktif generator ( $P_I$ ). Sudut daya yang diakibatkan oleh daya aktif generator adalah penyelesaian dari persamaan :

$$\frac{3|E|}{|Z_1|} \left( \frac{R_1}{|Z_1|} |E| + |V_{a1}| \cos(\delta + \beta_1 - \phi_1) \right) - P_m = 0 \quad (27)$$

Persamaan (27) adalah persamaan titik operasi generator pada kurva daya. Titik operasi yang stabil adalah sudut daya yang lebih kecil dari sudut  $\phi_1$ , yaitu :

$$\delta_1 = \phi_1 - \beta_1 - \cos^{-1} \left( \frac{P_m |Z_1| - 3|E|^2 R_1 / |Z_1|}{3|E||V_{a1}|} \right) \quad (28)$$

Komponen sudut daya akibat osilasi daya adalah penyelesaian kondisi *steady state* persamaan :

$$\frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} \left( -D \frac{d\delta_2}{dt} - \frac{3|E||V_{a2}|}{|Z_2|^2} \cos(-2\omega_s t - (\delta_1 + \beta_1) - \phi_2) \right) \quad (29)$$

yaitu :

$$\delta_2 = -|\delta_2| \cos(-2\omega_s t - (\delta_1 + \beta_1) - \phi_2 - \lambda) \quad (30)$$

$$|\delta_2| = \frac{3|E||V_{a2}|}{|Z_2|^2 \sqrt{(8H\omega)^2 + (2D\omega)^2}} \quad (31)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{D}{4H} \right) \quad (32)$$

Sudut daya pada kondisi *steady state* :

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (33)$$

Komponen osilasi pada sudut daya akan mempengaruhi kecepatan dan frekuensi sistem. Kecepatan dan frekuensi akan mengandung komponen sinusoidal.

#### A. Frekuensi

Dari persamaan (33), perubahan frekuensi generator:

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{d\delta_2/dt}{2\pi} = -2f_0 |\delta_2| \sin(-2\omega t - (\delta_1 + \beta_1) - \phi_2 - \lambda)$$

Jadi frekuensi generator adalah :

$$f = f_0 - 2f_0 |\delta_2| \sin(-2\omega_s t - (\delta_1 + \beta_1) - \phi_2 - \lambda) \quad (35)$$

#### B. Kecepatan putaran

Berdasarkan persamaan (35), kecepatan putaran generator adalah

$$N = \frac{120}{P_f} (f_0 - 2f_0 |\delta_2| \sin(-2\omega t - (\delta_1 + \beta_1) - \phi_2 - \lambda)) \quad (36)$$

## 2. STUDI KASUS

### Data jaringan dan generator

Hasil yang diperoleh diterapkan pada jaringan yang ditunjukkan pada gambar 2. Data jaringan dan genmerator adalah sebagai berikut :

- Generator

Tegangan internal generator =  $1 \angle 10$  pu

$$X_d = 1,81, X_2 = 1,81, X_0 = 1,81$$

$$R_a = 0,003, R_2 = 0,063, R_0 = 0,005$$

$$\text{Konstanta kelembaman } (H) = 1$$

$$\text{Faktor redaman } (D) = 0.1$$

$$\text{Jumlah kutub } (P_f) = 2$$

- Transformator

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 = 0,05 + j0.15 \text{ pu}$$

- Saluran

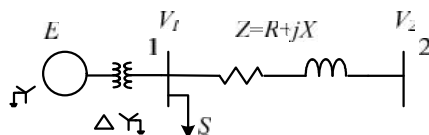
$$Z_1 = Z_2 = 0,1 + j0,3 \text{ pu}, Z_0 = 0,1 + j0,9$$

pu

- Tegangan bus 2 :  $1 \angle 30$  pu

Beban

Pembagian beban pada setiap fasa ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 2. Jaringan yang digunakan untuk studi kasus

**Tabel 1. Pembagian beban pada setiap fasa**

No.	Daya nominal beban (pu)		
	Fasa a	Fasa b	Fasa c
1	$0.3 + j0.1$	$0.3 + j0.1$	$0.3 + j0.1$
2	$(0.3 + j0.1) - 20\%$	$0.3 + j0.1$	$0.3 + j0.1$
3	$(0.3 + j0.1) - 40\%$	$0.3 + j0.1$	$0.3 + j0.1$
4	$(0.3 + j0.1) - 80\%$	$0.3 + j0.1$	$0.3 + j0.1$
5	$(0.3 + j0.1) - 20\%$	$(0.3 + j0.1) + 20\%$	$0.3 + j0.1$
6	$(0.3 + j0.1) - 40\%$	$(0.3 + j0.1) + 40\%$	$0.3 + j0.1$
7	$(0.3 + j0.1) - 80\%$	$(0.3 + j0.1) + 80\%$	$0.3 + j0.1$

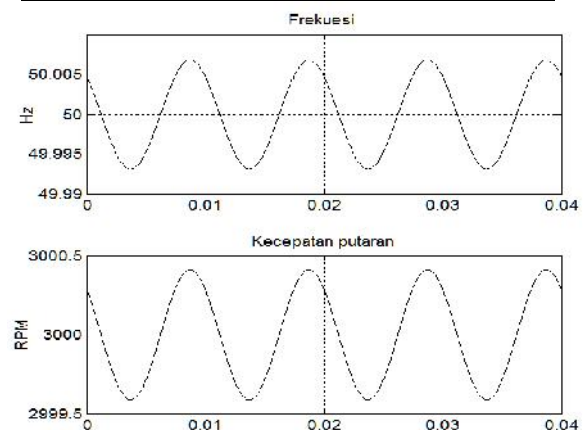
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis diperlihatkan pada tabel 2. Gambar 3 adalah penyelesaian numerik

persamaan (26) untuk kasus nomor 7. Penyelesaian tersebut diperoleh tanpa perubahan kondisi pada jaringan sehingga hasil yang diperoleh berlaku untuk kondisi steady state.

**Tabel 2. Hasil Perhitungan Pengaruh Ketidakeimbangan Beban**

No	Amp. Osi Daya (pu)	Sudut daya (derajat)	Amp. Osi sudut (derajat)	Amp. Osi. Frek. (Hz)	Amp. Osi Kec. (rpm)
1	0	12.52	0	0	0
2	0.0254	12.27	0.0006	0.001	0.0607
3	0.0512	12.01	0.0012	0.002	0.1223
4	0.104	11.49	0.0024	0.0041	0.2481
5	0.0436	12.51	0.001	0.0017	0.1039
6	0.0868	12.5	0.002	0.0035	0.2071
7	0.1721	12.42	0.0039	0.0068	0.4108



Gambar 2. Frekuensi Dan Kecepatan Putaran Generator Untuk Kasus Nomor 7

Hasil yang diperoleh pada tabel 2 menunjukkan bahwa semakin besar ketidakseimbangan pembagian beban, amplitudo osilasi daya semakin besar. Osilasi daya menyebabkan selalu terdapat perbedaan energi antara rotor dan stator. Perbedaan energi tersebut harus diimbangi oleh rotor dengan cara mengurangi atau menambah kecepatannya. Hal ini

menimbulkan osilasi pada sudut daya, frekuensi dan kecepatan putaran.

Jika ditinjau dari segi mekanis, beban yang tidak sama pada setiap fasa menyebabkan resultan gaya disekeliling poros rotor memiliki nilai tertentu, tidak sama dengan nol. Resultan gaya tersebut mengakibatkan rotor cenderung bergerak translasi. Gerak translasi rotor menimbulkan getaran dan memperbesar gesekan antara poros rotor dengan *bearing*.

#### 4. KESIMPULAN

Kecepatan putaran dan frekuensi pada kondisi tak seimbang dapat diketahui dengan persamaan (35) dan (36). Amplitudo osilasi kecepatan putaran dan frekuensi dipengaruhi oleh daya yang dihasilkan oleh komponen urutan negatif, konstanta kelembaman dan faktor redaman.

#### DAFTAR PUSTAKA

- A. von Jouanne dan B. B. Banerjee, 2000, *Voltage unbalance: Power quality issues, related standards and mitigation techniques*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, EPRI Final Rep.
- R. Bergeron, 1989, *Voltage unbalance on distribution systems—Phase I*, Canadian Electrical Association, Montréal, Québec, Project no. 231 D 488
- M. H. Hesse and J. Sabath, 1971, *EHV double-circuit untransposed transmission line-analysis and tests*, IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-90, issue 3, pp. 984-992
- M. Chindris dkk, 2007, *Propagation of Unbalance in Electric Power Systems*, Electrical Power Quality and Utilisation
- P. Paranavithana dkk, 2009, *Propagation Of Voltage Unbalance From Hv To Mv Power Systems*, 20th International Conference on Electricity Distribution Prague, 8-11
- H. Saadat, 1999, *Power system analysis*, McGraw-Hill, Singapore
- W.J. Bonwick dan P.J. Hession, 1992, *Fast measurement of real and reactive in three phase circuits*, IEE Proc-A, Vol. 139
- Usta dan M. Bayrak, 1999, *A new digital algorithm for protection of synchronous generators against unbalanced fault conditions*, Large Engineering System Conference on Power Engineering, Halifax, Canada
- M. Bayrak dan O. Usta, 1999, *Instantaneous power in unbalanced three phase system*, ELECO'99 International Conference on Electrical and Electronical Engineering
- P. Kundur, 1994, *Power system stability and control*, McGraw-Hill, New York.
- W. D. Stevenson, 1993, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga, Jakarta.